

# An energy-economic scenario analysis of alternative fuels for transport

**Doctoral Thesis****Author(s):**

Gül, Timur

**Publication date:**

2008

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005699807>

**Rights / license:**

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

DISS. ETH NO. 17888

# **AN ENERGY-ECONOMIC SCENARIO ANALYSIS OF ALTERNATIVE FUELS FOR TRANSPORT**

A dissertation submitted to  
ETH ZÜRICH

for the degree of  
Doctor of Science

presented by  
Timur Gül

Dipl.-Ing., University of Stuttgart, Germany  
M.Sc., Royal Institute of Technology (KTH) Stockholm, Sweden  
born 27.09.1976  
citizen of Germany

accepted on recommendation of  
Prof. Dr. Alexander Wokaun, examiner  
Prof. Dr. Aldo Steinfeld, co-examiner  
Mr. Socrates Kypreos, co-examiner

Zürich 2008



## Abstract

Climate change and energy security are two key challenges that policy-makers are confronted with today. Specifically, a central policy concern is ensuring the provision of adequate, reliable and affordable access to energy services for meeting basic human needs and maintaining economic growth on the one hand, while on the other hand reducing greenhouse gas emissions from the consumption of fossil energy carriers in energy supply. The transport sector plays a pivotal role in this quest due to its heavy reliance on petroleum products and an expected growth in transport demand in the decades to come. Thereby, transport is a constant liability with regard to greenhouse gas emissions from the combustion of petroleum fuels, and its high vulnerability to volatile oil markets and resource scarcity.

Alternative fuels, and in particular hydrogen and biofuels, are potential substitutes to petroleum fuels that may help to overcome the dependency of transport on petroleum fuels and to reduce greenhouse gas emissions. These fuels possess numerous attributes that make them suitable for responding to the above challenges, but they still require substantial research and development efforts to become commercially viable. Moreover, the potential and competitiveness of these fuels for meeting climate change mitigation and energy security policy objectives is yet unclear, due to a lack of understanding key drivers and key bottlenecks to their deployment.

This dissertation seeks to improve this understanding by assessing the competitiveness of alternative fuels in transport with a particular focus on hydrogen and biofuels. The assessment is delineated into three key analyses that aim to provide a comprehensive overview on the competitiveness of these fuels in meeting climate change and energy security objectives. Firstly, a static analysis of the costs of individual parts of the fuel chain provides insights into key cost components of hydrogen and biofuels production and distribution. This is followed by two modelling analyses on a European and on a global level, using the European Hydrogen MARKAL model (EHM) and the Global Multi-regional MARKAL model (GMM), designed to understand technology dynamics, interactions with the broader energy system and bottlenecks.

The analysis of policies targeting climate change mitigation and energy security finds that biofuels are used in transport across all scenarios investigated. However, there are two central determinants affecting the extent of their utilization. Firstly, this is the regional availability of cheap biomass: areas with low potential and high costs are found to apply other options for decarbonisation of transport, in particular the utilization of hybrid-electric vehicles that allow for quick reduction of petroleum fuel consumption. Secondly, the degree of biofuels utilization is driven by the stringency of the climate policy target pursued. Biofuels are competitive mostly for mild climate policy targets. The more stringent the target, however, the more biomass is cost-effectively used in other sectors.

Hydrogen can become an important and competitive alternative fuel for transport, as it can be produced from zero- to near zero carbon emitting production facilities. This makes hydrogen an attractive energy carrier for pursuing climate change mitigation targets. However, there are two key obstacles for hydrogen. That is firstly the future costs of the fuel cell, which is required to achieve costs in the order of US\$ 40 to 50 per kW to assure market competitiveness. The sooner such costs can be achieved, the earlier hydrogen fuel cells can become competitive. Secondly, the development of a hydrogen distribution infrastructure is a key bottleneck. The analysis with GMM, which includes a high level of detail for hydrogen distribution infrastructure as a result of this dissertation, shows that central hydrogen production, delivered by pipelines, is likely to dominate hydrogen synthesis in the long-run. Early hydrogen deployment takes place most cost-effectively through central hydrogen routes as well, i.e. is initiated in pilot regions. However, mobilising the required investments for such projects is an important policy challenge. An analysis of minimum deployment levels for hydrogen delivery infrastructure conducted here reveals that these investments are only mobilised if stringent climate policy targets are pursued to achieve an atmospheric CO<sub>2</sub> concentration of 450 ppmv by the end of the 21<sup>st</sup> century. Thus, utilising hydrogen for transport is on the one hand motivated by climate policy targets, but on the other hand limited to stringent climate policy regimes.

Policy-makers, thus, need to bring forward clear, consistent and early climate policy targets in order to mobilise required investments for achieving them. The present analysis shows that particularly stringent climate policy requires the deployment of a broad portfolio of technologies and significant structural changes in the energy

system. Under a flexible carbon policy regime, the bulk of investment in the deployment of new energy technologies, in particular for hydrogen, takes place in the second half of the century. However, it takes policy incentives today to facilitate critical R&D and early experience to ensure that the necessary technology development takes place so that hydrogen and biofuels can become a commercially viable option for achieving climate policy targets later.

*Keywords: Climate change, Energy security, Hydrogen, Biofuels, Transport, MARKAL*

## Kurzfassung

Klimawandel und Energieversorgungssicherheit sind zwei zentrale globale Herausforderungen. Insbesondere stellt sich die Frage, wie der Zugang zu geeigneten, verlässlichen und erschwinglichen Energiedienstleistungen sichergestellt werden kann, um grundlegende menschliche Bedürfnisse zu decken und Wirtschaftswachstum zu fördern, während gleichzeitig die Treibhausgasemissionen aus dem Verbrauch fossiler Energieträger in der Energiebereitstellung gesenkt werden müssen. Der Transportsektor spielt in diesem Zusammenhang eine zentrale Rolle durch seine hohe Abhängigkeit von Erdöl. Aufgrund des zu erwartenden Anstiegs des Mobilitätsbedarfs in den nächsten Jahrzehnten ist abzusehen, dass die Bedeutung des Transportsektors hinsichtlich Treibhausgasemissionen und Versorgungssicherheit weiter zunehmen wird, letzteres gerade auch vor dem Hintergrund steigender Ölpreise und Ressourcenknappheit.

Alternative Treibstoffe und insbesondere Wasserstoff und Biotreibstoffe bieten sich als potenzielle Substitute an, um die Abhängigkeit des Transportsektors vom Erdöl und die resultierenden Treibhausgasemissionen zu verringern. Beide Treibstoffe erscheinen am ehesten geeignet für die Herausforderungen Klimawandel und Versorgungssicherheit, doch benötigen sie zum Teil noch bedeutenden Forschungs- und Entwicklungsaufwand, bevor sie kommerziell eingesetzt werden können. Ihr tatsächliches Potenzial und ihre Wettbewerbsfähigkeit hinsichtlich des Erreichens von Klimaschutz- und Versorgungssicherheitszielen sind noch unklar, da zu wenig über Einflussfaktoren auf ihre Nutzung bekannt ist.

Die vorliegende Doktorarbeit hat zum Ziel, zu einem verbesserten Verständnis ebendieser Faktoren beizutragen. Zu diesem Zweck wurden drei Arten von Untersuchungen durchgeführt, die einen möglichst umfassenden Gesamtüberblick über das Themenfeld bieten sollen. Zum einen wurde eine statische Kostenanalyse der einzelnen Teile der Treibstoffbereitstellungskette durchgeführt, mittels derer Einblicke in die bedeutendsten Kostenfaktoren gewonnen werden konnten. Anschließend wurden zwei modellgestützte Analysen durchgeführt, davon eine auf europäischer Ebene mit Hilfe des European Hydrogen MARKAL Modells (EHM), und eine auf globaler Ebene mit dem Global Multi-regional MARKAL Modell (GMM).

Mittels dieser Energiesystemmodelle konnten Einblicke in die Dynamik von technologischem Wandel sowie in Interaktionen des gesamten Energiesystems gewonnen werden.

Die Analyse von Rahmenbedingungen zur Erreichung von Klimaschutz- und Energieversorgungssicherheitszielen zeigt, dass Biotreibstoffe eine bedeutende Rolle im Transportsektor spielen können. Es zeigt sich jedoch, dass es zwei zentrale Einschränkungen gibt, die das Ausmaß der Nutzung von Biotreibstoffen bestimmen. Dies ist zum einen die regionale Verfügbarkeit von kostengünstiger Biomasse: je weniger davon vorhanden ist, desto wichtiger werden andere Möglichkeiten zur Minderung von Treibhausgasemissionen, insbesondere Hybridfahrzeuge. Zum anderen ist es das zu erreichende Klimaschutzziel. Biotreibstoffe sind besonders wettbewerbsfähig bei moderaten Emissionsminderungszielen, doch je höher das gesteckte Ziel, desto mehr wird die knappe Ressource Biomasse in anderen Sektoren des Energiesystems benötigt.

Wasserstoff kann in der Zukunft ein bedeutender und wettbewerbsfähiger Energieträger werden, da er emissionsarm hergestellt werden kann. Dadurch ist Wasserstoff gerade für die Erreichung von Klimaschutzzielen interessant. Doch auch für die Nutzung von Wasserstoff im Transportsektor gibt es zwei zentrale Hürden. Dies sind zum einen die Kosten der Brennstoffzelle, die möglichst schnell auf gut 40 bis 50 US\$/kW gesenkt werden müssen, um ihre Wettbewerbsfähigkeit sicherzustellen. Zum anderen ist dies die Infrastruktur zur Verteilung von Wasserstoff. Die Analysen mit GMM, das als Ergebnis der vorliegenden Arbeit über eine detaillierte Abbildung der Erzeugung und Verteilung von Wasserstoff verfügt, zeigen, dass Wasserstoff langfristig in Großanlagen hergestellt und mittels Pipeline verteilt wird. Auch in frühen Phasen der Wasserstoffnutzung ist dies der kostenoptimale Weg und beginnt mit Pilotprojekten. Es ist jedoch eine bedeutende Herausforderung, die dafür notwendigen Investitionen zu mobilisieren. Die Analysen in vorliegender Arbeit zeigen, dass nur ambitionierte Klimaschutzziele zur Stabilisierung der atmosphärischen CO<sub>2</sub> Konzentration auf 450 ppmv dafür ausreichend Anreiz bieten. Dadurch ist das Erreichen von Klimaschutzzielen zwar eine zentrale Motivation für die Verwendung von Wasserstoff, doch bleibt sie auf ambitionierte Ziele beschränkt.



Aufgabe der Politik ist daher, rechtzeitig transparente und konsistente Rahmenbedingungen zu schaffen, damit die erforderlichen Investitionen mobilisiert werden können. Die vorliegende Arbeit zeigt, dass besonders ambitionierte Klimaschutzziele einen hohen Bedarf an neuen Energietechnologien und einen hohen Umstrukturierungsaufwand im Energiesektor nach sich ziehen. Auch wenn durch flexible Ausgestaltung der Klimaschutzpolitik der Grossteil des Investitionsbedarfs erst in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts zu erwarten ist, so braucht es dennoch schon heute politische Rahmenbedingungen, die Forschung und Entwicklung neuer Energietechnologien fördern und somit sicherstellen, dass diese Technologien, und insbesondere Wasserstoff, rechtzeitig zur Verfügung stehen, um Klimaschutzziele erreicht zu können.

*Stichwörter: Klimawandel, Energieversorgungssicherheit, Wasserstoff, Biotreibstoffe, Transportsektor, MARKAL*